过去近60 a黄河流域降水时空变化特征及未来30 a变化趋势

王澄海， 杨金涛， 杨 凯， 张飞民， 张晟宁， 李课臣， 杨 毅

（甘肃省气候资源开发及防灾减灾重点实验室，兰州大学黄河流域绿色发展研究院，
兰州大学地球系统模式发展研究中心，兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：近60 a来，黄河流域的气候发生了明显的改变，对流域地表水文、生态等过程产生了显著影响。利用1961—2018年黄河流域气象站观测的降水资料，分析了近60 a黄河流域降水时空变化特征，在此基础上，利用CMIP6模式中SSP245情景下未来30 a（2018—2047年）的预估结果，结合基于周期叠加的统计预估方法，对未来30 a黄河流域降水的可能变化趋势进行了预估。结果表明：黄河流域降水存在明显的年内、年际和年代际变化特征，显著振荡周期为2~4 a。在整个流域上，年和季节降水在年际尺度上表现出同位相变化特征，而年际变化异常显著区域不同。黄河流域年降水量的变率受季节降水的调制，夏季的降水多而呈现出强烈的区域性，而冬季降水少且全流域变化差异较小；黄河源区的降水在年内和年际尺度上都具有很好的稳定性；流域内受夏季风活动影响区域内的降水减少，受冬季风影响区域内的降水增加。黄河源区过去60 a的年降水表现出20.96 mm·(10a)$^{-1}$的增加趋势；预计未来30 a，年降水将以11.53~17.62 mm·(10a)$^{-1}$的速率继续增加；河套地区的年降水在过去60 a持续增加，增速为2.71 mm·(10a)$^{-1}$，未来年降水也会增加，但增长速率趋为平缓，约为0.52 mm·(10a)$^{-1}$；黄河下游地区过去60 a的降水呈现出减少趋势，未来仍会以5.46 mm·(10a)$^{-1}$的速率减少。

关键词：黄河流域；降水变化特征；周期叠加外推；CMIP6

黄河流域是我国重要的生态屏障，也是我国的重要经济地带，同时也是国家脱贫攻坚、区域协调发展与“一带一路”倡议等重要区域，在我国的经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。黄河流经地区大部分属于干旱、半干旱地区，其生态环境脆弱，是气候变化的敏感区。自20世纪60年代起，黄河流域的生态环境、水源涵养和人类活动等正发生着显著的变化[1-3]。气候变化导致黄河流域出现了冰川退缩、冻土融化、草原退化、水资源短缺等生态环境问题，对黄河流域生态安全产生了影响[4-6]。

自20世纪50年代以来，整个黄河流域平均气温总体呈上升趋势，20世纪90年代以后升温明显加快，2000年以后的年平均气温比20世纪50年代普遍升高了1 ℃以上[7-8]。黄河流域气候分布存在着显著的空间差异，受大气环流异常和地形地貌的影响，流域内的降水分布不均匀，总体上呈现出由西北向东南递增的趋势。黄河流域降水的季节分配也存在较大差异，夏季降水占全年降水的50%以上，而冬季降水只占3%左右[9-10]。降水作为基本的气候要素之一，是黄河流域水资源的直接来源，影响着流域内水资源的时空分布和利用格局以及水安全形势[11]。20世纪50年代以来的资料分析表明，黄河流域不同地区、不同季节的降水存在着不同变化特征。由于资料长短不一，分析区域划分差异，研究的结论存在着一定差异。有研究表明，1961—2010年黄河流域大多数测站年降水量呈减小趋势；在季节变化方面，除冬季外，春、夏季和秋季的降水量都是减少趋势[12]。也有研究表明，黄河流域上游具有明显的增加趋势，而中下游表现为明显的减少趋势[13]。最近的研究则表明，黄河流域季节性降水变化差异显著，春季和夏季以减少为主，且减少区

收稿日期：2021-11-11； **修订日期**：2022-01-13
基金项目：甘肃省重大科技项目（20ZD7FA005）；国家自然科学基金项目（91837205）；甘肃省重点实验室建设基金（20JR10RA654）
作者简介：王澄海（1961-），男，博士，教授，主要从事气候模拟和寒旱区陆面过程研究. E-mail: wch@lzu.edu.cn

域主要集中在陕西和山西地区；秋季降水以增加为主，河套地区的降水增加最为明显；冬季降水变化小，主要变化区分布在黄河流域中游地区[14]。可见，黄河流域降水已经发生的变化，未来黄河流域降水如何变化，是需要进一步深入研究和厘清的问题。

黄河流域降水存在显著的周期变化特征。已有研究[15-18]利用小波分析、最大熵谱分析法等方法对黄河流域多年降水序列的周期性进行了分析，得出了黄河流域年降水存在显著的2~6 a短周期、9~15 a和20~22 a的中周期以及60 a的长周期，2~4 a的短周期是黄河流域多数地区普遍的周期。但是，前述研究已表明，黄河流域不同时间尺度、不同地区的降水，其周期也具有一定的差异性。随着全球的气候变化，区域尺度上的降水变化特征也发生着变化，例如，极端降水事件增多，降水的空间分布不均匀性更加明显[19-20]。由此产生的问题是，全球变暖背景下，黄河流域的降水振荡周期是否也发生了变化？

黄河流域未来的降水会发生怎样的变化，是我们关注的另一个问题。区域气候模式RegCM4.0的预估结果表明，在RCP4.5情景下，黄河流域年降水整体增多，春、冬两季的增幅最为明显；在RCP8.5情景下年降水变化不大的区域较多，但冬季降水有大范围的增加[21]。气候变化引起黄河流域未来的年降水在大部分地区呈增加趋势，其中冬季河套地区为增加趋势，下游为减少趋势；而夏季则与冬季呈反向变化[22]。由于气候模式选用不同的物理过程参数化方案，气候模式预估的降水结果存在较大的不确定性，尽管多数气候模式预估不同情景下黄河流域以增湿为主，但仍有一些模式预估黄河流域未来降水可能减少[23]。综合M-K检验和R/S检验2种统计方法诊断的黄河流域未来降水趋势表明，黄河流域未来的年降水在上游会持续增加，而中游的降水为减少趋势[24]。可见，基于不同方法对黄河流域未来降水的预估结果存在不一致。

上述表明，尽管关于黄河流域过去降水的变化特征和未来降水的变化趋势已有许多研究，但过去60 a间，黄河流域的降水的特征是如何变化的，未来会发生怎样的变化，需要进一步深入理解和厘清，尤其对于未来降水变化的预估存在较大不确定性，如何结合多种方法减小结果误差，需要深入探讨。

本文将黄河流域划分为黄河源区、河套地区和黄河下游地区，利用近60 a黄河流域气象站点的观测资料和CMIP6中气候模式的预估结果，结合统计方法预估黄河流域未来降水的变化趋势，分析黄河流域降水变化事实，为黄河流域水资源的合理利用及未来可持续发展提供科学依据。

1 研究区域、资料和方法

1.1 研究区概况

黄河流域位于32°~42°N，95°~120°E之间，其东西长约1900 km，南北宽约1100 km，流域面积7.95×10^5 km^2（黄河网，http://www.yrcc.gov.cn/hhyl/hhgk/hd/lyfw/201108/t20110814_103452.html）。流域内山脉众多，海拔落差悬殊，地形地貌差异巨大。黄河源区位于青藏高原东北部的半干旱高寒地区，季风影响较小；中部的河套地区属于干旱半干旱区，下游位于半湿润区，受夏季风影响显著。因此，流域内各区域的气候各异，降水的空间分布差异显著，降水量呈由东南向西北递减的特征（图1）。

为研究黄河流域内不同地区的气候变化特征，本文将黄河流域划分为黄河源区（33°~37°N，96°~104°E），河套地区（34.5°~41°N，104°~112°E）以及黄河下游地区（34°~38°N，112°~119°E）分别进行分析，具体划分见图1。以往研究大多采用黄河水利委员会（http://www.yrcc.gov.cn/images/map3.htm）的区域划分方案，该方案是综合区域地质环境、河谷地貌特征、水资源条件、流域社会状况、治理开发要求等因素提出的（http://www.yrcc.gov.cn/hhyl/hhwd/zrdlp/201108/t20110812_95002.html），本文在此基础上，主要根据黄河流域降水量的分布，缩小了上游地区的范围，使其只包含黄河流域的高原地区，即黄河源区，中游地区则包含了黄河“几”字拐弯口大部分地区，下游地区则包含了黄河山西、河南、山东段的周边地区。

黄河流域各区域气候差异较大，年降水量在不同区域呈现明显的空间差异，黄河源区地处青藏高原东部，海拔高，支流多，年均降水量为400~800 mm，是黄河径流量的主要供给地区；河套地区横跨河套平原、鄂尔多斯高原、毛乌素沙地和黄土高原，地处我国西北部，属于干旱半干旱气候，年均降水量较少且空间差异性大，为100~500 mm；下游地区属于半湿润气候，流域的山西、河南、山东三段，降

水相对较多,可达600~1000 mm。

1.2 站点观测

本文使用了1961—2018年黄河流域及周边地区(32°~45°N,95°~120°E;图1)的223个气象站点的逐日降水量数据,数据由中国气象数据网(http://data.cma.cn/)提供,并经过了质量控制和均一性检验。为了方便计算,采用径向基函数的线性插值将观测资料插值到0.25°×0.25°的格点上,该方法可以较好的表现出黄河流域的空间分布。

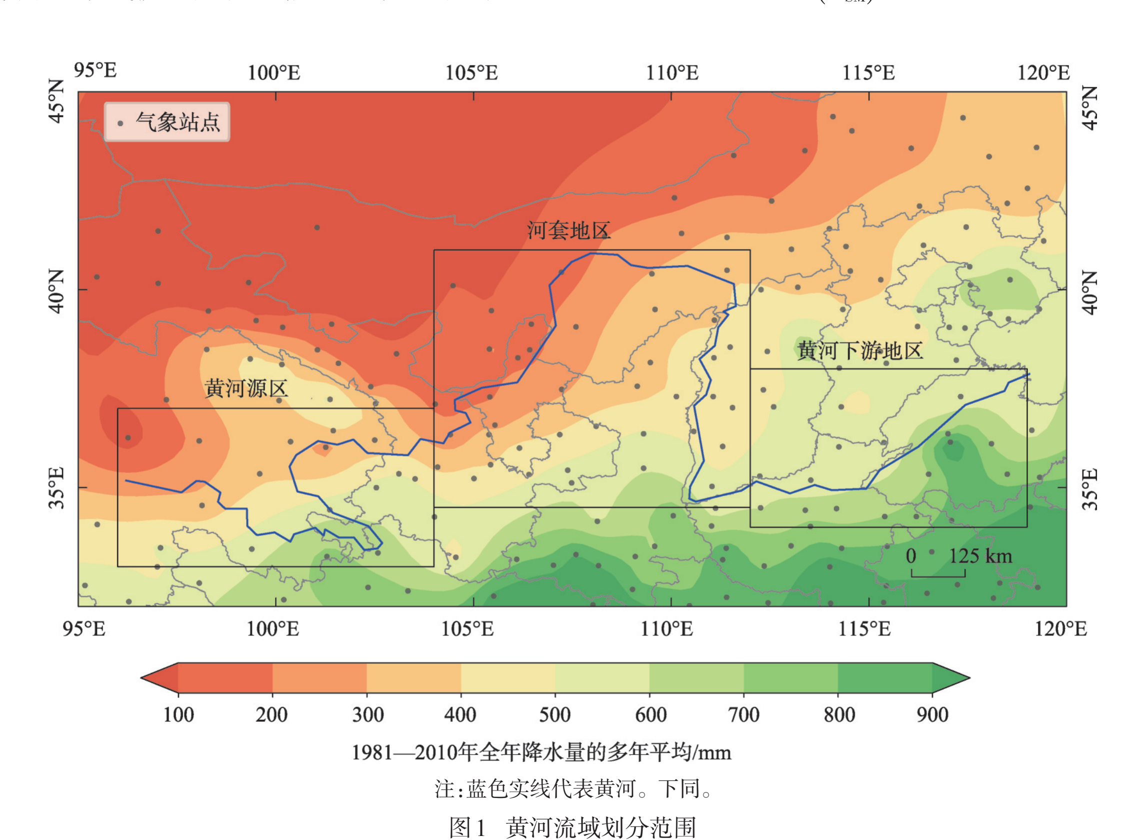
1.3 气候模式

本文采用国际耦合比较计划(CMIP)第6阶段的资料。鉴于CMIP6气候模式中SSP245情景最接近未来实际发展状况,因此本文选用该情景的预估结果作为未来气候的变化预估。根据已有研究对CMIP6多模式进行评估的结果[25-28],本文选取了5个CMIP6全球气候模式未来30 a(2018—2047年)的逐月降水预估结果(https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/)进行分析,模式具体信息见表1。

1.4 研究方法

由于气候模式对降水的模拟存在系统性误差[29-30],本文选择Murphy[31]提出的订正方法,对CMIP6模式模拟的未来的降水进行订正。该方法利用观测值与模拟值的距平及标准差来对模拟值进行订正,可以有效减小模拟结果的系统性偏差,对气候漂移有较好的订正效果[32]。对任意一年的降水,采用如下公式订正:

$$P_R = \frac{\sigma(P_{OBS})}{\sigma(P_{SM})}\left(P_{SM} - \overline{P_{SM}}\right) + \overline{P_{OBS}} \quad (1)$$



注:蓝色实线代表黄河。下同。

图1 黄河流域划分范围

Fig. 1 The Yellow River Basin

表1 CMIP6模式简介

Tab. 1 Introduction of CMIP6 mode

模式名称	所属机构	水平分辨率
BCC-CSM2-MR	国家气候中心(BCC)	1.125°×1.12°
CESM2-WACCM	美国国家大气科学研究中心(NCAR)	1.25°×0.94°
EC-Earth3	欧盟地球系统模式联盟(EC-Earth-Cons)	0.703°×0.703°
GFDL-ESM4	美国国家大气海洋局地球流体动力学实验室(NOAA-GFDL)	1.25°×1.0°
IPSL-CM6A-LR	法国皮埃尔-西蒙拉普拉斯研究所(IPSL)	2.5°×1.26°

式中：P 为分析变量，本文为降水量；P_{OBS} 是观测降水量；P_{SM} 为降水量的模拟值；P_R 是订正后的降水量；$\sigma(P_{OBS})$ 是观测值的标准差；$\sigma(P_{SM})$ 是模拟值的标准差；$\overline{P_{SM}}$ 是模拟值的平均值；$\overline{P_{OBS}}$ 是观测值的平均值。

对每年的降水量按照公式（1）进行逐年订正，即可得到分析时段上模拟的降水量的订正值。按照公式（1）对分析空间场中每个格点的降水量进行订正，即可得到分析空间场上各格点的订正序列 P_R。

为了便于预估与观测结果比较，本文采用双线性插值法将不同分辨率的模式资料插值到水平分辨率为0.25°×0.25°的格点上。多模式集合平均可以有效降低单个模式模拟的不确定性，故本文采用等权重算术平均法对不同模式模拟结果进行集合，在集合平均前，先对各模式预估结果订正。

为了分析黄河流域降水的周期特征，本文利用Morlet小波分析法，对黄河流域降水进行周期分解，得到主要的振荡周期，并对结果进行显著性检验。

为了分析黄河流域降水量的时空变化特征，本文对1961—2017年的黄河流域全年和4个季节的降水进行经验正交函数（EOF）分解。

气候系统受到不同时间尺度的外界周期或非周期性的强迫作用，因此，降水变化是不同时间尺度的各种过程叠加的结果[33]。降水预估的基本思想是，为了分辨降水中的外部强迫和内部变率，笔者近似地认为，降水 $P(N)$ 是由外部强迫项 $\bar{P}(N)$ 和内部变率项 $P'(N)$ 组成。外部强迫项用线性趋势表示，在原始序列 $P(N)$ 减去线性趋势，为降水内部变率项 $P'(N)$ [33]，即：

$$\bar{P}(N)=b_0+bN \tag{2}$$

$$P'(N)=P(N)-\bar{P}(N) \tag{3}$$

式中：b_0 表示拟合函数的截距；b 表示函数的斜率；N 为年份；P 为降水。

首先计算出黄河流域内各地区降水的外部强迫项 $\bar{P}$，并从原降水中分离出内部变率项 P'，然后利用线性拟合得到外部强迫项的降水变化，并利用周期分析得到的主要周期进行叠加外推得到内部变率项的降水变化。最后，结合外部强迫和内部变率引起的降水变化，可得到黄河流域未来的降水变化。

具体做法为，利用1961—2017年黄河流域降水的序列资料，通过一元线性回归，计算出线性变化部分 $\bar{P}(N)$，进行拟合外延至未来30 a，得到未来30 a降水外部强迫项的预报 $\bar{P}(M)$，其中 $M=N+30$。对序列 $P'(N)$ 进行周期分析，从中提取通过显著性检验的 T 个主要周期，将序列 $P'(N)$ 按第一次得到的周期叠加，得到序列 $P_1(N)$，以第一周期进行拟合、外延至 M，得到第一个预报序列 $P_1(M)$；然后在序列 $P'(N)$ 中减去序列 $P_1(N)$，得到序列 $P_1'(N)$；在 $P_1'(N)$ 的基础上用同样的方法，将按第二周期叠加后的平均值以第二周期进行排列外延至 M，用 $P_1'(N)$ 减去按第二周期叠加的平均值，得到序列 $P_2'(N)$，在 $P_2'(N)$ 的基础上依此类推……，最后可得到第 T 个预报序列 $P_T(M)$。把降水的外部强迫预报 $\bar{P}(M)$ 和内部变率预报 $P_T(M)$ 相加，得到降水的最终预报 $P(M)$。

$$P(M)=\bar{P}(M)+P_T(M) \tag{4}$$

2 黄河流域过去近60 a的降水变化特征

2.1 黄河流域降水的年变化特征

为了分析黄河流域不同地区降水的年内变化特征，图2给出了黄河流域降水的逐月变化。由图2可见，黄河源区、河套地区和黄河下游地区的月降水存在明显年内变化，夏季（6月、7月和8月）是黄河流域全年降水的主要贡献时段。黄河源区和黄河下游地区的最大降水月份是7月，而河套地区降水在8月达到峰值。黄河源区和河套地区的月降水最大值在80 mm以上（占全年的22%~23%），下游地区最大值可达175 mm以上（占全年的27.6%）。冬季（12月、1月和2月）则是黄河流域降水量最小的3个月，月降水不足10 mm。对比不同地区月降水量的年际变化，黄河流域各地区降水的标准差均在7—8月最大，即降水最大的月份其年际变率也最大。各个月的降水年际变率在黄河源区最小（2~21 mm·a^{-1}），河套地区次之（2~30 mm·a^{-1}），黄河下游地区最大（7~55 mm·a^{-1}），即黄河源区的降水变化相对稳定，而黄河下游地区的降水变化不稳定。

2.2 过去近60 a黄河流域降水时空变化特征

为了分析黄河流域降水量的时空变化特征，对

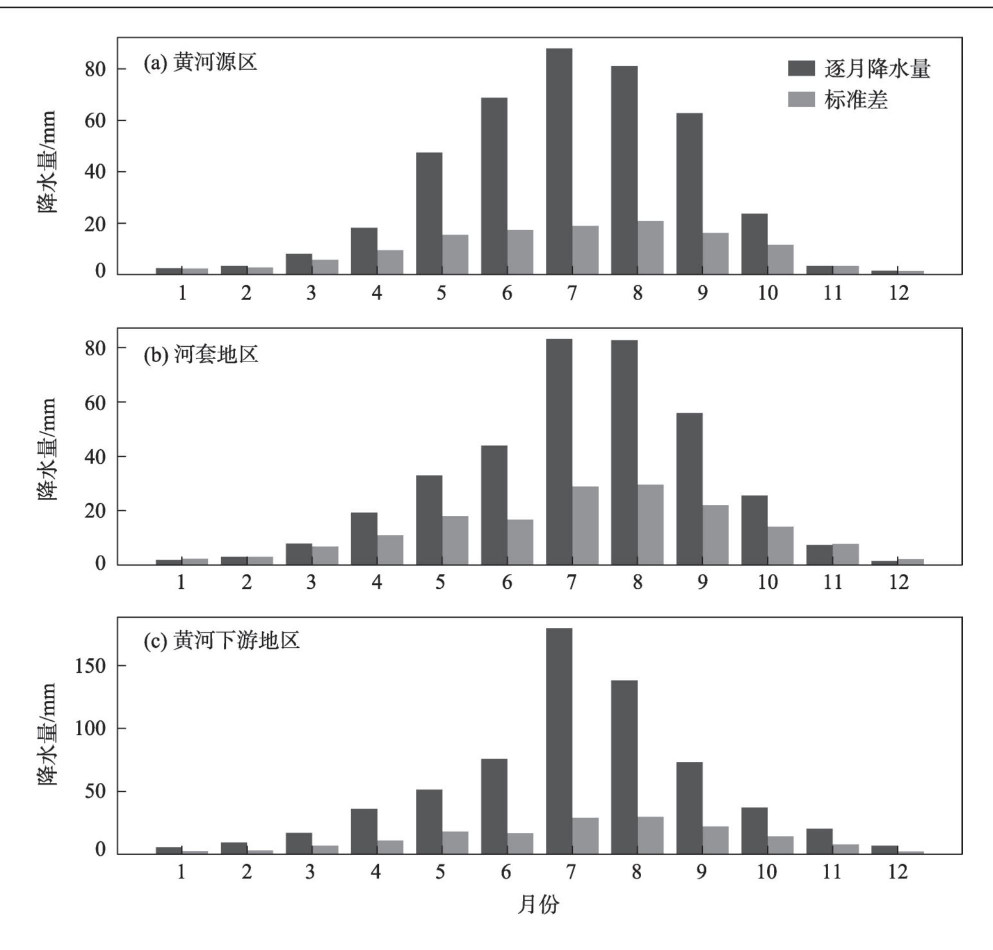


图2 黄河流域不同地区近60 a(1961—2018年)的逐月降水量及其标准差

Fig. 2 Monthly rainfall and standard deviation in the different regions of Yellow River Basin for the last 60 years (1961–2018)

1961—2017年黄河流域年和各季节降水进行了EOF分解。表2给出了EOF分解结果前3个模态的方差贡献率,结果显示,年和各季节降水量的第一模态方差贡献均为24.96%以上。其中冬半年(春、冬季)的降水收敛性最好,尤其冬季达到了69%,反映出黄河全流域处于冬季风控制之下,降水变化基本一致;而夏季的收敛性最差,反映出黄河流域的降水虽然主要发生在夏季,但是,降水的空间差异大,影响上中下游降水的天气系统不同。本文研究的是在流域尺度上的降水变化,而第一模态反映的是流域尺度上降水的总体分布特征,故只对第一模态进行分析。

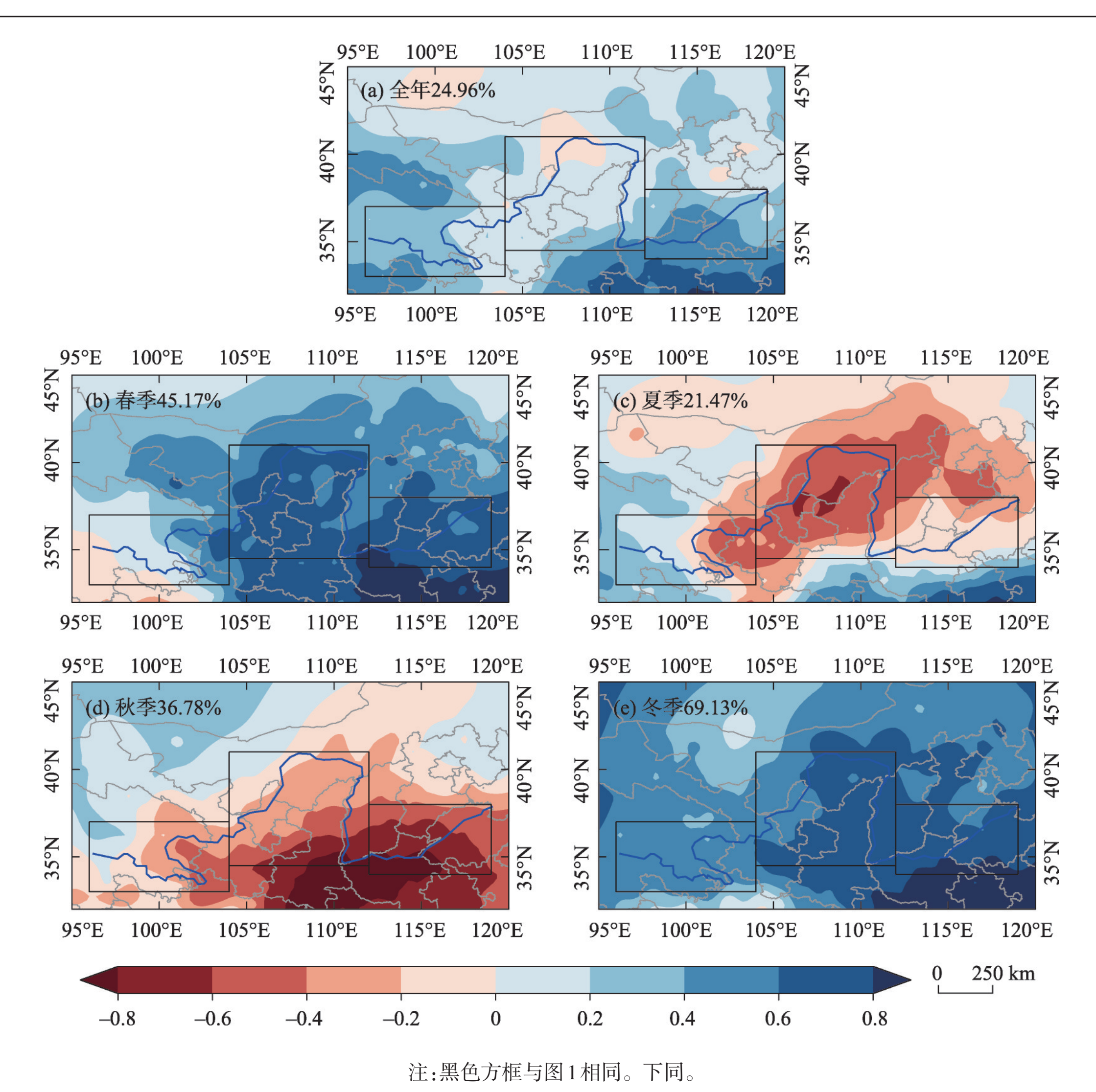
表2 1961—2016年黄河流域年和各季节降水量EOF分解前3个模态的方差贡献率

Tab. 2 Variance contribution of the first 3 modes of the EOF decomposition for annual and seasonal precipitation in the Yellow River Basin from 1961 to 2016

	全年	春季	夏季	秋季	冬季
LV1/%	24.96	45.17	21.47	36.78	69.13
LV2/%	13.65	10.31	12.73	13.41	9.92
LV3/%	9.90	7.41	11.80	7.47	4.87
合计/%	48.51	62.89	46.00	57.66	83.92

注:LV1表示第一模态的时间序列;LV2表示第二模态的时间序列;LV3表示第三模态的时间序列。

图3给出了黄河流域年和各季节降水量EOF分解的第一模态载荷向量(Loading Vector-LV)的空间分布。可以看出,黄河流域年降水(图3a)在整个流域上有较好的一致性,河套地区和黄河源区及下游的降水存在相反的变化,既反映出下游地区和河套地区受季风影响的差别,也反映出高原高寒地区和下游半湿润区之间存在着联系。春季黄河流域降水(图3b)的第一模态占总方差的45.17%,河套地区和黄河下游地区的降水具有相同的变化,反映出这2个区域的降水在春季的支配气候系统应该是相同的。夏季降水的第一模态占总方差的21.47%,特征向量(图3c)的大值中心在河套地区(LV<-0.4),表



注：黑色方框与图1相同。下同。

图3　1961—2017年黄河流域年和各季节降水经验正交分解的第一特征向量场

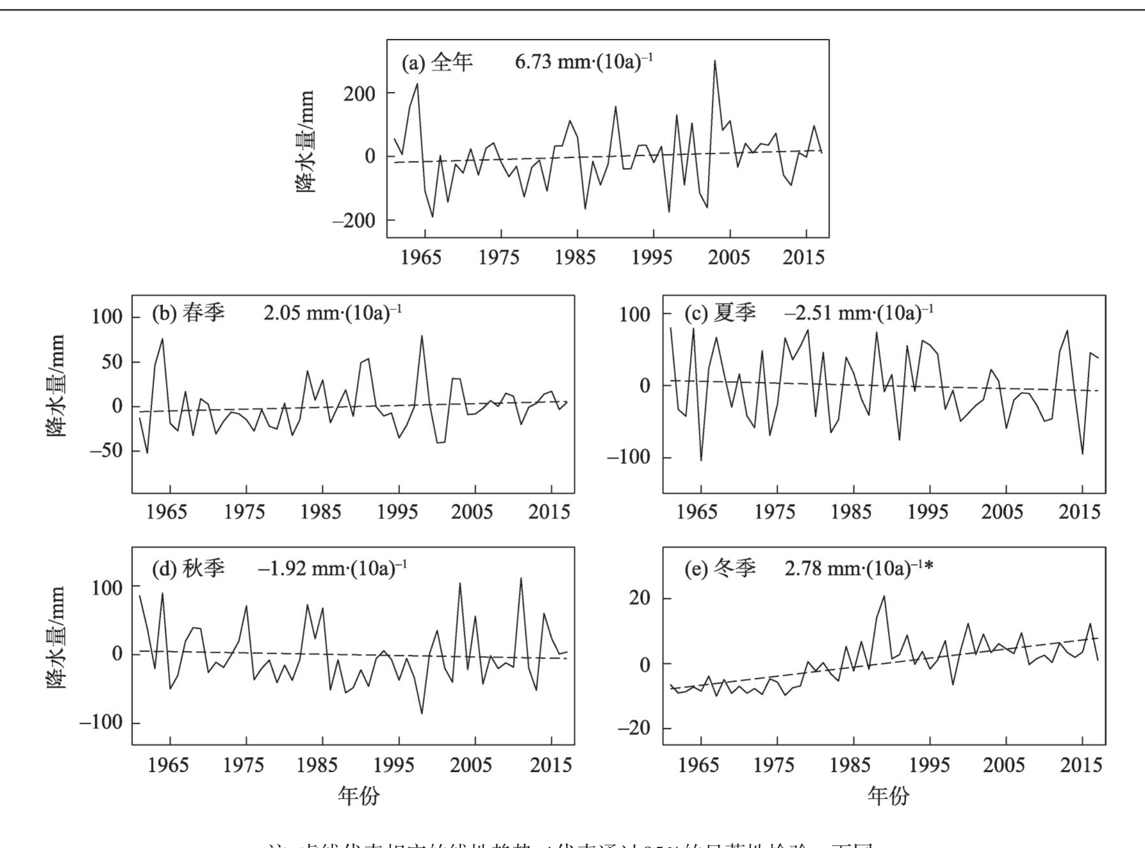
Fig. 3　First eigenvector fields of annual and seasonal precipitation in the Yellow River Basin from 1961 to 2017

明河套地区夏季降水的年际变率在黄河流域中最大，是降水较不稳定的地区，干旱少雨是主要特征，也是降水量对流域水量补给最少的地区。秋季降水的第一模态占总方差的36.78%，大值中心（图3d）在流域内的河南段（LV>0.6），反映了黄河河南段的秋季降水变率较大，降水年际变率不稳定，这和夏季风南撤的时间有关。冬季降水的第一模态占总方差的69.13%，也是黄河流域四季降水中收敛性最好的季节，空间变化特征（图3e）与春季相似，反映出黄河全流域处于冬季风控制之下。综上所述，黄河流域年降水量的变率受季节降水的调制，夏季的降水多而呈现出强烈的区域性，而冬季降水少且全流域变化差异较小。

为了进一步明确黄河流域降水在过去60 a的变化特征，图4给出了载荷向量绝对值大值区内（|LV|>0.4）的降水年际变化。从图中可以看出，过去60 a黄河流域全年降水量在降水不稳定地区呈增长趋势，增速为6.73 mm·(10a)$^{-1}$，冬、春季降水在年际变率较大的地区也是增长趋势，其中冬季是显著增加的，而夏、秋季则呈现减少趋势，减少速率为1.92~2.51 mm·(10a)$^{-1}$。综上所述，1961—2017年以来，黄河流域冬半年降水在年际变率大值区呈现增加趋势，夏半年降水呈减少趋势。即，黄河流域受夏季风影响的区域内降水减少，受冬季风影响的区域内降水增加。

2.3　黄河流域降水的周期性

为了分析黄河源区降水变化的周期特征，图5给出1961—2016年黄河源区降水量的小波分析结果，可以看出，黄河源区年降水在1961—2016年期间，主要存在2~4 a的显著振荡周期；在20世纪90



注：虚线代表相应的线性趋势；*代表通过95%的显著性检验。下同。

图4 载荷向量(LV)绝对值大值区内(|LV|>0.4)的降水(距平)年际变化

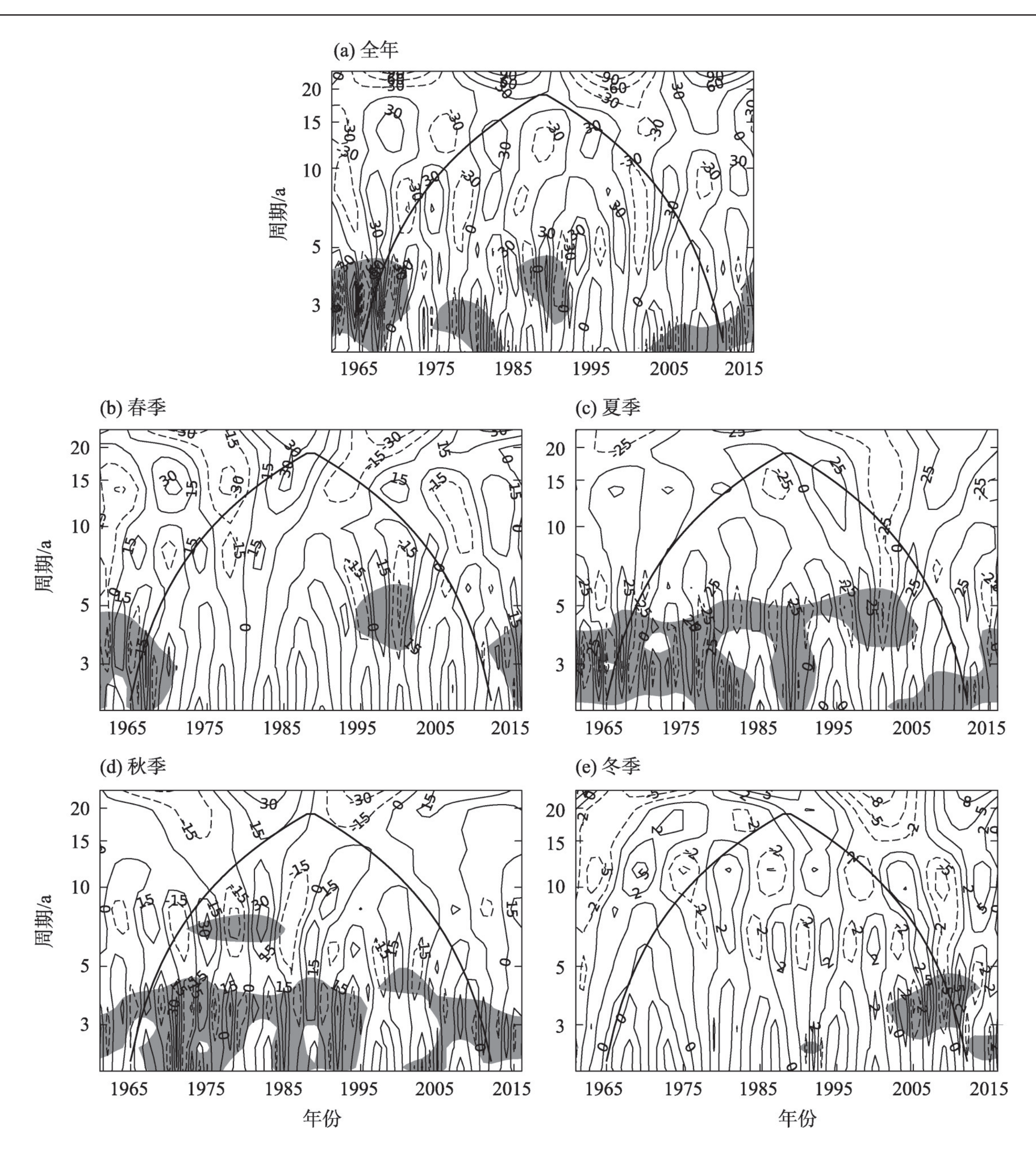
Fig. 4 Interannual variation of precipitation within the region of larger absolute values of the load vector (|LV|>0.4)

年代表现为4~6 a的振荡周期；1961—2000年间，年降水的准14 a振荡周期尽管不显著，但一直稳定存在，说明了黄河源区的年降水存在相对稳定的年代际变化信号。

黄河源区的春季降水在20世纪60年代有2~5 a的显著振荡周期；1994—2004年存在着3~6 a的振荡周期，具有明显的年际变化的特征。夏季降水是年降水的主要贡献时段，自1961年以来一直存在着2~5 a的显著振荡周期。秋季降水量仅次于夏季，其小波振幅与夏季相似，过去近60 a内具有2~5 a的显著振荡周期，此外，1961—1995年间还存在准8 a的振荡周期，尤其在20世纪70年代和80年代初较为显著。冬季降水在20世纪以后出现了3~5 a的显著振荡周期。黄河源区的夏、秋两季的降水量占年降水量的75%以上[9]，且2个季节振荡周期相近，这意味着年降水周期变化主要由夏、秋两季的降水主导。

对比黄河流域各区段降水的振荡周期(表3)，可以看出，1961—2016年间，河套地区和下游地区降水的主要振荡周期特征均表现为，年降水和夏、秋季降水都存在2~4 a的振荡周期，冬、春季的降水周期性并不稳定存在。周期的显著性和EOF的分析结果基本一致，夏、秋季降水的振荡周期决定着年降水周期的变化。另外，上述给出的是去除线性趋势后的小波分析结果，对比未去除线性趋势的结果(图略)，两者基本一致，说明了全球变暖对黄河流域降水的振荡周期产生的影响不大。

黄河流域降水的周期性研究由于分析区域和时段的不同，结论存在着一些差异。根据1951—1999年的西北地区降水资料分析表明，西北地区降水量普遍存在3 a左右的周期，以及相对较稳定但不太显著的10 a左右的周期[34]，而对整个黄河流域1956—2000年的降水分析认为有准3 a、11 a和22 a左右的周期[17]；1961—2000年黄河流域年降水和各季节降水的分析认为，黄河流域年降水和各季节降水存在着4~6 a以及8~12 a的周期特征[15]。黄河流域1959—2017年站点的资料分析认为，黄河流域的站点普遍存在着2~4 a的显著短周期[18]。尽管不同时段、资料类型的研究结果稍有不同，但和本文得出的黄河流域年和各季节降水的2~4 a的显著周期



注：灰色阴影代表周期通过了95%的显著性检验。

图5 黄河源区的小波系数

Fig. 5 Wavelet coefficients for the Yellow River source area

表3 1961—2016年黄河流域降水变化的主要周期特征

Tab. 3 Main characteristics of oscillation period in precipitation variation in the Yellow River Basin from 1961 to 2016

	黄河源区	河套地区	黄河下游地区
全年/a	2~4*,4~6*,14	2~4*,6*	2~6*,12
春季/a	2~5*,3~6*,8	2~6*,8*	2~6*,8*
夏季/a	2~5*,14	2~4*,6*,8*	2~4*,6*,15
秋季/a	2~5*,8*	2~4*,11	2~4*,8*,10
冬季/a	3~5*,12	3*,4*,16	2~5*,15

注：*表示通过了95%的显著性检验。

基本一致。此外，本文的结果还显示，黄河流域还存在6 a、8 a显著振荡周期以及相对稳定的12 a、14~15 a振荡周期。因此，笔者可以利用其周期性进行外推预报。

3 黄河流域未来30 a降水变化的时空变化特征的预估

通过对黄河流域降水的基本特征和周期性的分析，得出了黄河流域年和各季节降水具有显著短

周期以及相对稳定的中长周期。基于周期分析得到的主要周期，利用公式(2)~(4)并结合CMIP6模式的预估结果，给出了黄河流域未来的降水变化。

图6给出了黄河源区降水变化的趋势过去近60 a(1961—2017年)和未来30 a(2018—2047年)黄河流域降水的变化趋势，可以看出，在过去近60 a，黄河源区年降水呈现出显著的增加趋势，增速为20.96 mm·(10a)$^{-1}$，4个季节的降水均表现为增加趋势，其中，春季增速最大，为10.16 mm·(10a)$^{-1}$，冬季增速最小。基于周期叠加外推方法，预估未来30 a黄河源区的年降水将继续呈增加趋势，但年降水的增长速率较过去有所减缓。各季节未来的降水趋势都为增加，相较于过去近60 a的变化，增速明显减小，春季降水的增速减缓幅度最大，由过去的10.16

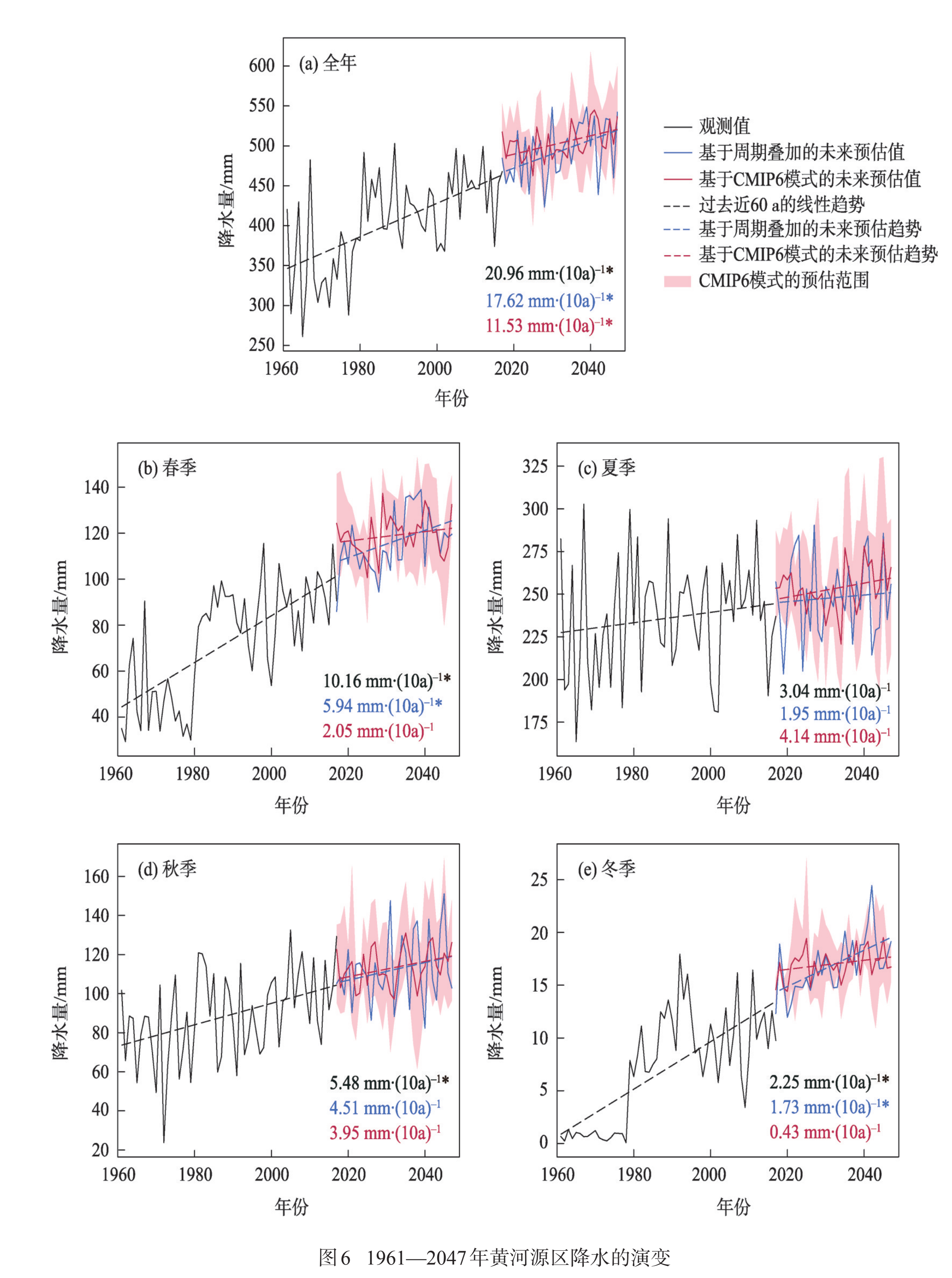


图6 1961—2047年黄河源区降水的演变

Fig. 6 Evolution of precipitation in the Yellow River source area from 1961 to 2047

mm·(10a)$^{-1}$降至5.94 mm·(10a)$^{-1}$。对比不同季节降水在未来30 a的变化趋势，春季降水的增速依然最大，而冬季降水增速最小，为1.73 mm·(10a)$^{-1}$。气候模式的预估结果表明，黄河源区全年和各季节的未来降水都呈现增长趋势，年降水增速相较于过去60 a减缓明显；对比不同季节降水的变化趋势，夏季降水的增速最大，为4.14 mm·(10a)$^{-1}$，这与统计方法得到的结论存在差异，而冬季降水增长趋势相对平缓。对比2种方法对未来的预估，结果显示，未来30 a黄河源区的年降水增加，但增速不同；统计方法和模式对黄河流域春、夏季降水变化趋势预估上存在一定差异。

黄河流域河套地区和下游地区降水的变化特征如图7a~图7j，可以看出，过去近60 a，河套地区年降水呈现增长趋势。除了夏季，河套地区其他季节都呈现增加趋势，其中冬季降水的增加趋势最为显著，增速可达2.16 mm·(10a)$^{-1}$，这与EOF分析的结果一致。周期叠加外推的结果也显示，未来30 a河套地区的年降水也会增加，但增长趋势较为平缓，为0.52 mm·(10a)$^{-1}$，这主要是由于春季和夏季降水的增速减小所导致。对比统计预估的结果，模式预估河套地区未来的年降水仍呈增加趋势，但增速远大于统计结果，两者相差13.92 mm·(10a)$^{-1}$。通过对比分析统计方法和气候模式对各季节降水的预估结果，表明2种方法对夏季降水变化速率的预测存在较大的差异，统计结果显示未来夏季降水以5.6 mm·(10a)$^{-1}$的速率减少，而模式结果以7.01 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加。黄河流域下游地区过去60 a的年降水呈减少趋势，夏季和秋季降水也呈减少趋势，而春季和冬季的降水为增加趋势。气候模式预估未来黄河流域下游地区年降水呈增加趋势，增速为21.28 mm·(10a)$^{-1}$，而统计预估为5.46 mm·(10a)$^{-1}$速率的减少趋势，二者预估结果相反，这与河套地区类似的是，2种方法也在夏季降水预估上存在着很大的差异。综上，对未来黄河流域中、下游夏季降水的预测具有较大的不确定性。

图8a~图8e给出了预估的未来降水相对于气候态（1981—2010年）的差值，由图可见，黄河源区的年和各季节降水量均增加，主要变化区位于青海东部地区，其中春季降水变化空间分布与年降水相似，且增加最为明显。河套地区未来年降水量以增加为主，其中陕西北部地区增加最大，其余地区降水增幅较小，春季和冬季的降水变化量不大，夏、秋两季的降水变化量大值区与年降水变化大值区相似。黄河下游未来年降水变化量的空间分布差异较大，商丘和济南一带增加明显，其余地区降水量大多减少，夏季的空间分布特征与年降水分布接近。因此，黄河源区未来年降水变化是由春季降水主导，而河套地区未来年降水变化主要受夏、秋季降水的影响，黄河下游地区未来年降水变化则主要是夏季降水的变化主导；整个流域的未来冬季降水都是增加的。

气候模式的预估结果（图8f~图8i）表明，黄河流域未来年降水量在全流域增加，其中下游地区降水增加最为明显。在春季，流域北部降水相较南部增加更多，尤其在山东省一带降水增加最多；在夏季，黄河流域的降水从玛曲向东北延展至整个陕西均减少，河套地区降水量均偏少，但黄河下游地区以山东丘陵为分界线，北侧降水量增多，而南侧降水量减少；在秋季，河套平原和黄土高原降水量有所增加，其余区域降水变化量较小；在冬季，整个流域内的降水量变化不明显。

综合模式预估和统计预测的结果均表明，黄河源区未来年降水量增加，但是统计预测的降水量明显大于模式在SSP245情景下预估的降水增量。2种方法对河套地未来年降水量预估的差异不大，但空间分布存在差异。2种方法对黄河下游未来降水的预估存在较大差异，统计预估的未来降水量在下游大部分地区减少，而模式预估降水变化相反，且除冬季外，两者方法预估的下游地区其余季节的未来降水变化量也存在明显不同。综上，黄河流域未来年降水的变化存在空间差异性，黄河源区、河套地区未来的年降水以增加为主，黄河下游地区未来的年降水在山东、河南省内的济南、商丘一带增加，其余地区未来降水的变化存在较大不确定性，需进一步探讨。

4 结 论

本文基于1961—2018年的观测资料和2018—2047年的CMIP6模拟预估结果，分析了过去近60 a与未来30 a的黄河流域降水的时空变化特征，得出以下结论：

（1）我国黄河流域降水存在多时间尺度的变化，整个流域年和季节降水有明显的年内、年际和

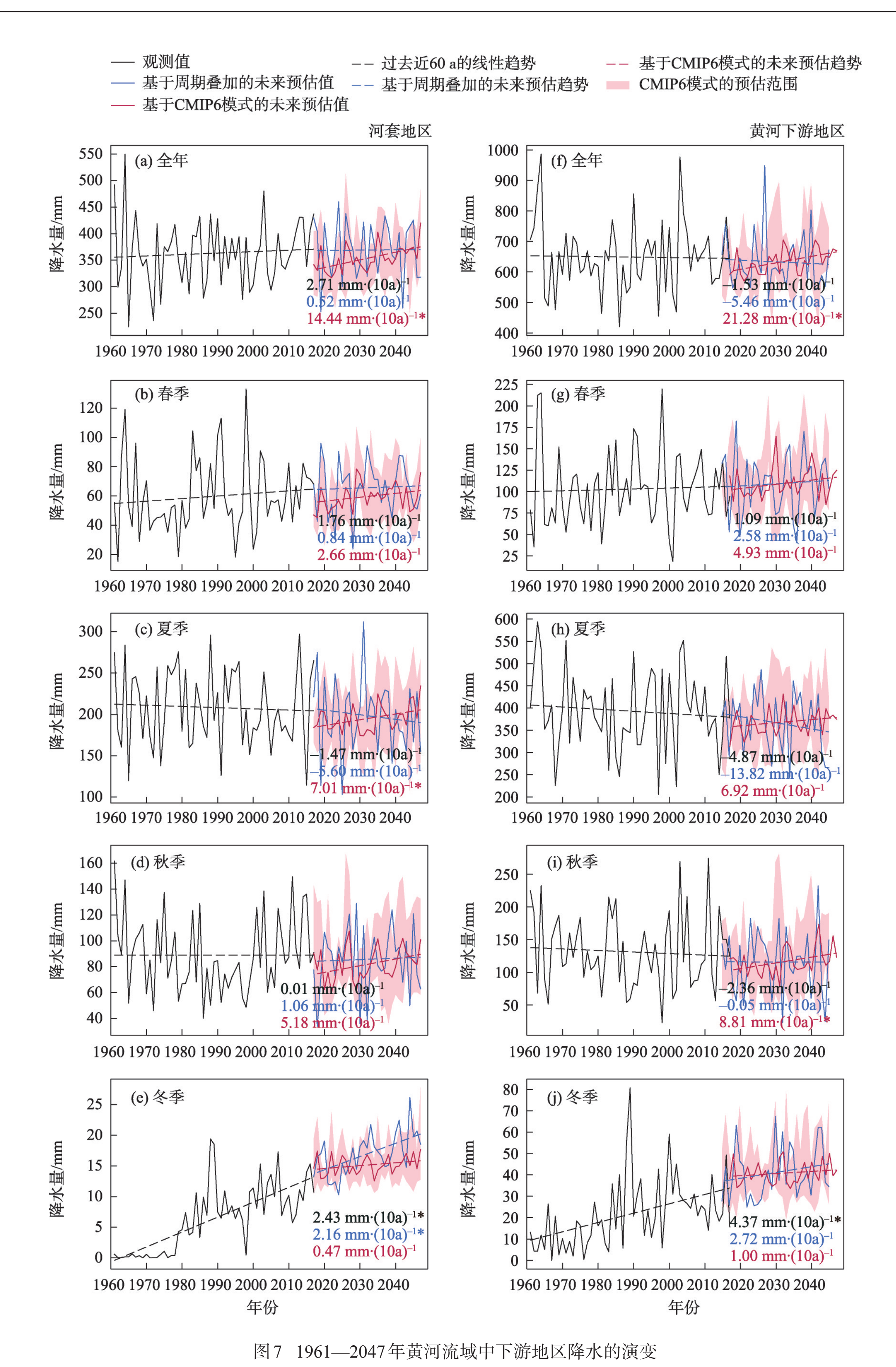


图7 1961—2047年黄河流域中下游地区降水的演变

Fig. 7 Evolution of precipitation in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin from 1961 to 2047

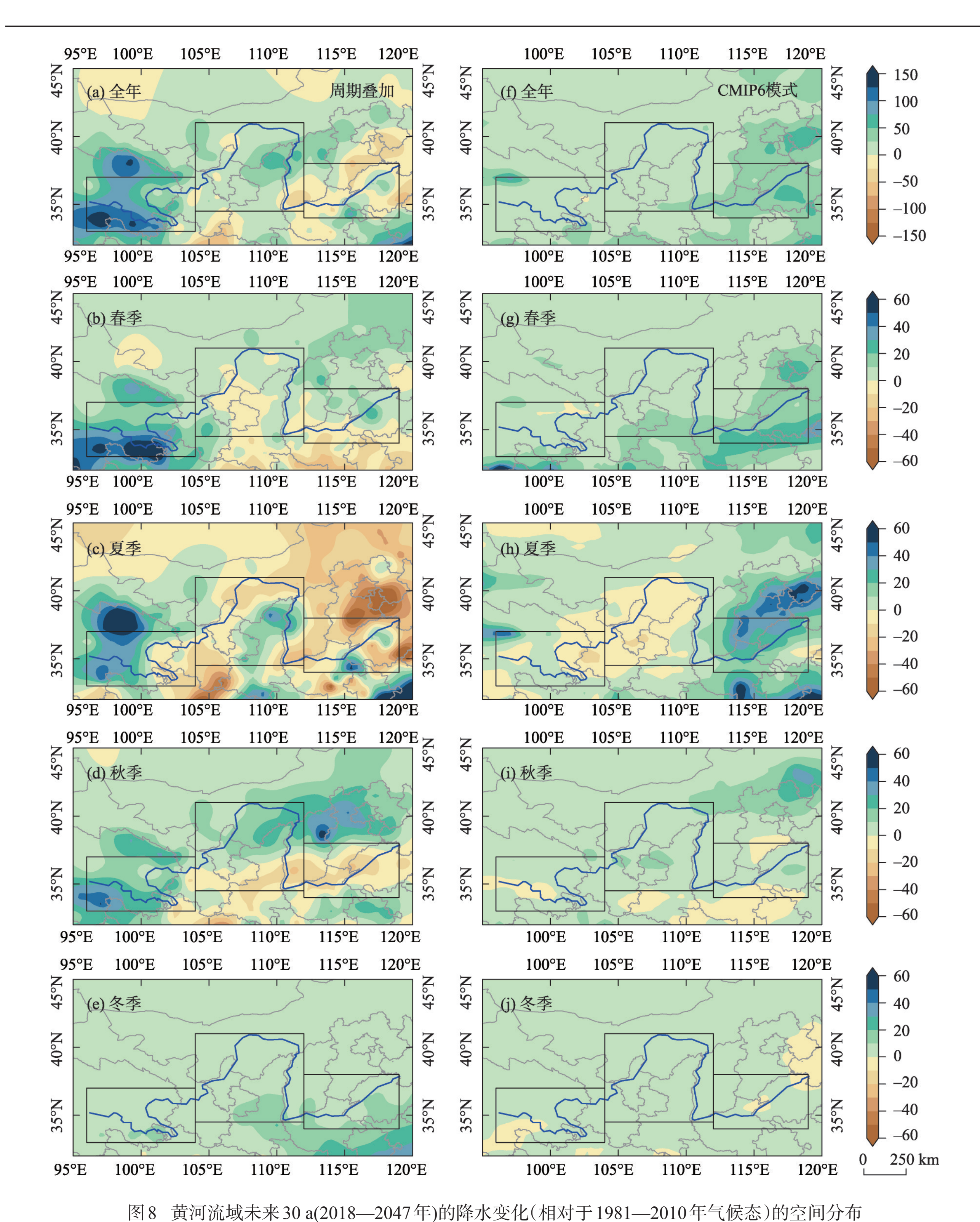


图8 黄河流域未来30 a(2018—2047年)的降水变化(相对于1981—2010年气候态)的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of precipitation changes (comparing to 1981−2010 climatology) in the Yellow River Basin for the next 30 years (2018−2047)

年代际变化,年和各季节降水均有2~4 a显著周期。黄河源区的降水变化相对稳定,黄河下游地区降水变率较大。在空间分布上,过去近60 a,黄河流域年和各季节降水的年际变化在整个流域内基本是同位相的,但年际变化的大值中心不同。黄河流域年降水量的变率受季节降水的调制,夏季的降水多而呈现出强烈的区域性,而冬季降水少且全流域变化差异较小。黄河流域受夏季风影响的区域内

的降水减少，而受冬季风影响的区域内的降水增加。

（2）过去近60 a，黄河源区年降水以20.96 mm·$(10a)^{-1}$增加，河套地区的年降水持续增加，增速为2.71 mm·$(10a)^{-1}$；黄河下游地区过去的年降水呈现减少趋势，速率为1.53 mm·$(10a)^{-1}$。动力和统计结合的预估结果表明，在未来30 a（2018—2047年），黄河源区年降水呈现11.53~17.62 mm·$(10a)^{-1}$增加趋势，河套地区的未来年降水也将增加，但增长趋势较为平缓，约为0.52 mm·$(10a)^{-1}$；黄河下游地区未来年降水仍会减少，速率约为5.46 mm·$(10a)^{-1}$。

已有的研究表明，CMIP6对黄河流域降水模拟的偏差较大[25,27-28]，因此，采用动力和统计结合的预估则可显著降低其不确定性。本研究在揭示黄河流域降水过去近60 a的变化特征的基础上，提出了一种动力统计结合的预估方法，可以有效降低不确定性。本文揭示出的黄河流域降水的特征，尽管在区域划分上和以往的研究[13-14]有一些差别，但结论仍基本一致。未来的预测结论相较于已有利用CMIP5的研究[21,23-24,35]仍会存在一些差异。由于本文使用的是在参数化方案、模式分辨率等方面有较大的改进和提高的CMIP6结果，且结合了统计方法，因此，本文给出的预估结果在未来黄河流域降水未来的变化相对更为合理。

参考文献(References)：

[1] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 61-72. [Zheng Ziyan, Lyu Meixia, Ma Zhuguo. Suggestions for countermeasures on climate and hydrology and vegetation cover changes and problems faced in the Yellow River source area[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 61-72.]

[2] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(11): 1504-1514. [Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Effects of climate change and human activities on vegetation cover changes on the Loess Plateau[J]. Chinese Science(Series D: Earth Science), 2007, 37(11): 1504-1514.]

[3] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被NDVI与温度、降水关系的时空变化[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 477-481, 502. [Liu Lvliu, Xiao Fengjin. Spatial and temporal variation of the relationship between NDVI and temperature and precipitation in the Yellow River Basin vegetation[J]. Journal of Ecology, 2006, 25(5): 477-481, 502.]

[4] 张镭, 黄建平, 梁捷宁, 等. 气候变化对黄河流域的影响及应对措施[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 42-51. [Zhang Lei, Huang Jianping, Liang Jiening, et al. Impacts of climate change on the Yellow River Basin and countermeasures[J]. Science and Technology Herald, 2020, 38(17): 42-51.]

[5] 肖风劲, 徐雨晴, 黄大鹏, 等. 气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 10-14, 52. [Xiao Fengjin, Xu Yuqing, Huang Dapeng, et al. Impacts of climate change on ecological security of the Yellow River Basin and adaptation measures[J]. People's Yellow River, 2021, 43(1): 10-14, 52.]

[6] 李开明, 李绚, 王翠云, 等. 黄河源区气候变化的环境效应研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1183-1192. [Li Kaiming, Li Xuan, Wang Cuiyun, et al. Study on the environmental effects of climate change in the Yellow River source area[J]. Glacial Permafrost, 2013, 35(5): 1183-1192.]

[7] 徐宗学, 隋彩虹. 黄河流域平均气温变化趋势分析[J]. 气象, 2005, 31(11): 8-11. [Xu Zongxue, Sui Caihong. Analysis of mean temperature trends in the Yellow River Basin[J]. Meteorology, 2005, 31(11): 8-11.]

[8] 杨特群, 饶素秋, 陈冬伶. 1951年以来黄河流域气温和降水变化特点分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(10): 76-77. [Yang Tequn, Rao Suqiu, Chen Dongling. Analysis of temperature and precipitation changes in the Yellow River Basin since 1951[J]. People's Yellow River, 2009, 31(10): 76-77.]

[9] 陈磊, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域季节降水变化特征分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 8-12, 16. [Chen Lei, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Analysis of seasonal precipitation variation characteristics in the Yellow River Basin[J]. People's Yellow River, 2016, 38(9): 8-12, 16.]

[10] 刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化[J]. 地理科学, 2002, 22(5): 513-519. [Liu Xiaodong, An Zhisheng, Fang Jiangang, et al. Possible changes of precipitation in the Yellow River Basin under global warming[J]. Geoscience, 2002, 22(5): 513-519.]

[11] 夏军, 彭少明, 王超, 等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 1-4, 15. [Xia Jun, Peng Shaoming, Wang Chao, et al. Impact of climate change on water resources of the Yellow River and its adaptive management[J]. People's Yellow River, 2014, 36(10): 1-4, 15.]

[12] 常军, 王永光, 赵宇, 等. 近50年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 43-54. [Chang Jun, Wang Yongguang, Zhao Yu, et al. Climate change characteristics of precipitation and rainy days in the Yellow River Basin in the last 50 years[J]. Highland Meteorology, 2014, 33(1): 43-54.]

[13] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52-60. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Zhou Tianjun, et al. Current status and considerations of climate and hydrological changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52-60.]

[14] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近40年气候变化的时空特征[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1048−1058. [Huang Jianping, Zhang Guolong, Yu Haipeng, et al. Spatial and temporal characteristics of climate change in the Yellow River Basin in the last 40 years[J]. Journal of Water Resources, 2020, 51(9): 1048−1058.]
[15] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 503−509. [Shao Xiaomei, Xu Yueqing, Yan Changrong. Wavelet analysis of precipitation series variation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2006, 42(1): 503−509.]
[16] 李占杰, 鱼京善. 黄河流域降水要素的周期特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 401−404. [Li Zhanjie, Yu Jingshan. Periodic characteristics analysis of precipitation elements in the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2010, 46(3): 401−404.]
[17] 朱厚华, 秦大庸, 周祖昊, 等. 黄河流域降水演变规律研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(11): 21−24, 81. [Zhu Houhua, Qin Dayong, Zhou Zuhao, et al. Study on the evolution of precipitation in the Yellow River Basin[J]. People ' s Yellow River, 2005, 27(11): 21−24, 81.]
[18] 王远见, 傅旭东, 王光谦. 黄河流域降雨时空分布特征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(11): 972−978. [Wang Yuanjian, Fu Xudong, Wang Guangqian. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall in the Yellow River Basin[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2018, 58 (11): 972−978.]
[19] Cui Danyang, Wang Chenghai, Santisirisomboon Jerasorn. Characteristics of extreme precipitation over eastern Asia and its possible connections with Asian summer monsoon activity[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(2): 711−723.
[20] Wang Chenghai, Cui Danyang, Santisirisomboon Jerasorn. Projected changes in extreme precipitation over eastern Asia in the 21st century[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(8): 3701−3713.
[21] 柳春. 黄河流域近50年气候变化及未来预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [Liu Chun. Climate Change in the Yellow River Basin in the Last 50 Years and Future Prediction[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.]
[22] 曹丽娟, 董文杰, 张勇, 等. 未来气候变化对黄河流域水文过程的影响[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(6): 746−756. [Cao Lijuan, Dong Wenjie, Zhang Yong, et al. Impacts of future climate change on hydrological processes in the Yellow River Basin[J]. Climate and Environment Research, 2013, 18(6): 746−756.]
[23] 王国庆, 乔翠平, 刘铭璐, 等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 1−8. [Wang Guoqing, Qiao Cuiping, Liu Minglu, et al. Analysis of future water resources trends in the Yellow River Basin under climate change[J]. Journal of Water Resources and Water Transport Engineering, 2020(2): 1−8.]
[24] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. 黄河流域未来水资源时空变化[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 28−39. [Zhou Shuai, Wang Yimin, Guo Aijun, et al. Spatial and temporal variation of future water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydropower, 2018, 37 (3): 28−39.]
[25] Xin Xiaoge, Wu Tongwen, Zhang Jie, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(15): 6423−6440.
[26] Kim Yeon-Hee, Min Seung-Ki, Zhang Xuebin, et al. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices[J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 29: 100269.
[27] Zhu Yuyao, Yang Saini. Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 239−251.
[28] Yang Xiaoling, Zhou Botao, Xu Ying, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(5): 817−830.
[29] 冯婧. 多全球模式对中国区域气候的模拟评估和预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. [Feng Jing. Simulation Assessment and Prediction of China's Regional Climate by Multi-Global Models[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.]
[30] Tian Jiaxi, Zhang Zengxin, Ahmed Zeeshan, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35: 831−848.
[31] Murphy James. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate[J]. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2256−2284.
[32] 余莲, 王澄海. 青藏高原地区土壤湿度的模拟及订正[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 531−538. [Yu Lian, Wang Chenghai. Simulation and revision of soil moisture in Qinghai-Tibet Plateau region[J]. Journal of Physics, 2012, 61(2): 531−538.]
[33] 王澄海, 李健, 李小兰, 等. 近50 a中国降水变化的准周期性特征及未来的变化趋势[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 1−10. [Wang Chenghai, Li Jian, Li Xiaolan, et al. Analysis quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trends in next 20 years in China [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 1−10.]
[34] 王澄海, 崔洋. 西北地区近50年降水周期的稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 576−584. [Wang Chenghai, Cui Yang. A study of the stability of the precipitation cycle over northwest china in the past 50 years[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21 (6): 576−584.]
[35] 王国庆, 张建云, 金君良, 等. 基于RCP情景的黄河流域未来气候变化趋势[J]. 水文, 2014, 34(2): 8−13. [Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Jin Junliang, et al. Future climate change trends in the Yellow River Basin based on RCP scenarios[J]. Hydrology, 2014, 34(2): 8−13.]

Changing precipitation characteristics in the Yellow River Basin in the last 60 years and tendency prediction for next 30 years

WANG Chenghai, YANG Jintao, YANG Kai, ZHANG Feimin, ZHANG Shengning, LI Kechen, YANG Yi

(Key Laboratory of Arid Climate Resource and Environment of Gansu Province, Institute of Green Development for the Yellow River Drainage Basin, Research and Development Center of Earth System Model, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The climate of the Yellow River Basin has distinctly changed in the past 60 years, which significantly impacts its surface hydrological and ecological processes. In this study, the spatial and temporal characteristics of precipitation in the Yellow River Basin in the past 60 years (1961−2018) were analyzed using in-situ precipitation observations in this basin. Future precipitation trends for the next 30 years (2018−2047) in the Yellow River Basin were projected using outputs from the SSP245 scenario in the CMIP6 model and statistical methods. Results show that there are significant annual, inter-annual, and inter-decadal variations in precipitation in the Yellow River Basin , with a significant oscillation cycle of 2−4 years. For the whole basin, annual and seasonal precipitation is basically isotropic at an inter-annual scale but significant areas of inter-annual variability anomalies are different. Spatial anomalies of precipitation are opposite in the cold season (winter-spring) and the warm season (summer-autumn), with a decrease in precipitation influenced by summer monsoon activity and an increase in precipitation influenced by the winter monsoon. There has been an increasing trend of 20.96 mm·$(10a)^{-1}$ in annual precipitation in the Yellow River source area for the past 60 years, and expected annual precipitation will continue to increase at 11.53−17.62 mm·$(10a)^{-1}$ over the next 30 years. Annual precipitation in the Hetao area of the Yellow River Basin has continued to increase in the past 60 years at a rate of 2.71 mm·$(10a)^{-1}$, but the rate of future increase has slowed to approximately 0.52 mm·$(10a)^{-1}$. In lower reaches of the Yellow River, a decreasing trend in precipitation in the past 60 years is presented and will continue to decrease at a rate of 5.46 mm·$(10a)^{-1}$.

Keywords: Yellow River Basin; precipitation variability characteristics; periodic overlay extrapolation; CMIP6